数学形态学在昆虫分类学上的应用研究. Ⅰ. 在目级阶元上的应用研究

赵汗青[1]，沈佐锐[1*]，于新文[2]
（1. 中国农业大学植物保护学院昆虫系，北京 100094；2. 西南林学院动物保护与利用系，昆明 650224）

摘要：根据昆虫图像，对半翅目（Hemiptera）、鳞翅目（Lepidoptera）、鞘翅目（Coleoptera）的34种昆虫提取形状参数、叶状性、球状性等7项数学形态特征进行了统计分析，从而论证了各项数学形态特征在目级昆虫分类阶元上作为分类特征的可行性和可靠性，并从数学形态学角度对所涉及到的同阶元昆虫类群的亲缘关系做了描述。结果表明，在作为目级阶元分类特征时，各项特征的可靠性依次为：（似圆度、偏心率、亮斑数）>（叶状性、球状性、圆形性）>形状参数。由这些特征的差异显著性可知，从数学形态特征角度讲，3个目的亲缘关系远近大小依次为：半翅目与鞘翅目>半翅目与鳞翅目>鳞翅目与鞘翅目。

关键词：昆虫分类；数学形态特征；计算机视觉技术；目级阶元
中图分类号：Q964 **文献标识码**：A **文章编号**：0454-6296（2003）01-0045-06

Use of math-morphological features in insect taxonomy. Ⅰ. At the order level

ZHAO Han-Qing[1]，SHEN Zuo-Rui[1*]，YU Xin-Wen[2]（1.Department of Entomology，China Agricultural University，Beijing 100094，China；2.Department of Forestry Protection，Southwest Forestry College，Kunming 650224，China）

Abstract：This paper evaluates the feasibility and reliability of assigning insects to orders according to math-morphological features（MMF）and describes kinship among the insects of various categories within the same taxonomic level from the perspective of mathematical morphology. Statistical analyses of 7 MMF（such as form factor，lobation，etc.）from images of 34 species of insects of the Hemiptera，Lepidoptera and Coleoptera were used in this evaluation. The results indicate that the ranked reliability of MMF for assigning insects to orders is，from high to low：roundness，eccentricity，hole number > lobation，sphericity，circularity > form factor. According to variation in each MMF，the kinship of the three orders examined could be ranked as follows：Hemiptera & Coleoptera > Hemiptera & Lepidoptera > Lepidoptera & Coleoptera.

Key words：insect taxonomy；math-morphological character（MMC）；computer vision technology；order

在目前使用的昆虫分类方法中，无论是传统分类学还是数值分类学，对昆虫进行分类的主要依据都是昆虫的身体特征。这些特征包括昆虫的颜色、斑纹、身体附属物（瘤突、刻点、纤毛等）及大小（体长、体宽）等（袁锋，1996）。对于昆虫的数学形态特征，除了体长和体宽外，所用甚少，但是可以认同的是，不同种昆虫的体型大小不一，形态各异，虫体面积、周长、偏心率、似圆度等等的一些数学特征只是限于手段的局限才没有应用到分类中去，而这些能够表现不同昆虫类群身体形态的量化特征有可能更精确、全面的反映不同昆虫类群的差别。如果数学形态特征能够应用到昆虫分类学中，那无疑对推动昆虫分类学的发展具有革命性的意义。数学形态学（mathematical morphology）是一门建立在集合论基础上的学科，涉及到几何学、拓扑学、概率论、图论等。数学形态学用集合描述二值图像或灰度图像中显示的不同的几何形状，并说明目标的结构特点。随着计算机科学的快速发展和广

基金项目：国家“863”项目（863-306-ZD05-02-03）；国家自然科学基金项目（30270168）
作者简介：赵汗青，男，1973年9月生，博士，研究方向为数学形态特征在昆虫分类学上的应用，E-mail：hqz99@263.net
＊ 通讯作者 Author for correspondence
收稿日期 Received：2001-12-24；接受日期 Accepted：2002-04-25

泛应用，计算机视觉技术在医学等行业应用日益广泛，以计算机视觉技术为手段，对包括昆虫在内生物的图像进行特征提取和分析，并利用计算机提取的特征对生物物种进行分类成为可能，但这些工作仅限于对计算机提取特征在识别生物上的应用，尚未从分类和系统发育角度对某一生物类群的数学形态特征进行系统研究（Serra，1982；李月景，1985；Boyle *et al*.，1988；Baxes，1994；Tanimoto，1995；崔砣，1996；刘景东，1996a，1996b；Parker，1996；章毓晋，1997；马颂德等，1998；沈佐锐等，1998；Smith，2000；Gonzalo Giribet *et al*.，2001；赵汗青等，2002）。本研究基于对半翅目、鳞翅目、鞘翅目等3目19科总计34种昆虫的图像研究，提取和分析了图像中这些昆虫的面积、周长、偏心率、似圆度等11项数学特征，并分为3篇论文（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ）论述在目、总科及科的阶元上这些数学特征在昆虫分类中的应用可能性。本文描述了研究的第一部分结果，即数学形态特征在目级阶元上的昆虫分类应用。

1 材料与方法

1.1 供试材料

隶属于半翅目、鳞翅目、鞘翅目的3目19科34种昆虫，每种昆虫各取50个左右的成虫标本用数码相机获取图像。昆虫的名录见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 图像的获取与预处理：用Olympus数码相机将固定好的昆虫标本照相、输入计算机。照相时的焦距统一为25 cm。对于因标本破损而有残缺的图像，根据昆虫左右对称的原理利用图像处理软件Photoshop及Paintshop进行修补。

1.2.2 图像中昆虫的数学形态特征提取：利用中国农业大学IPMIST试验室开发的昆虫图像处理与自动识别软件BugVisux，分别对每种昆虫的各幅重复图像进行处理和昆虫特征提取。提取的特征包括面积、周长、横轴长、纵轴长、形状参数、叶状性、球状性、圆形性、偏心率、似圆度、亮斑数等11项。其中面积（area，A）是区域的一个基本特性，它描述区域的大小，表示区域内图像象素的总和。以黑色（象素值为0）表示目标区域，白色（象素值为1）表示背景，则对于图像分割后的二值图像$f(x,y)$而言，目标区域的面积就是：

$$A = N - \sum_{i=1}^{N} f(x,y)$$

其中N为二值图像象素总数。周长（perimeter，P）就是边界的长度，是一种简单的边界全局特征，它是指所包围区域的轮廓的周长，计算公式为：

$$P = \sum_{i=1}^{N} n_i \text{，其中，} N \text{ 为边界点数，}$$

$$n_i = \begin{cases} 1 & x_i \bmod 2 = 0 \\ \sqrt{2} & x_i \bmod 2 = 1 \end{cases}$$

横轴长（x-length，XL）和纵轴长（y-length，YL）指图像中昆虫的最大体宽（或翅展长）和最大体长，对应于图像分析中常用的边界的长轴和短轴。形状参数（shape-parameter，F）的定义为：

$$F = \frac{\| P \|^2}{4\pi \times A}$$

其中F为形状参数，P为区域的周长，A为区域的面积。叶状性（lobation，B）反映了边界的幅度特征（Yonekawa *et al*.，1996），定义为：

$$B = \frac{R_1}{W}$$

其中B为叶状性参数，R_1为区域重心到边界的最短距离，W为最大宽度。对昆虫图像而言，最大宽度取其横轴长度。球状性（sphericity，S）定义为：

$$S = \frac{r_1}{r_2}$$

其中，r_1为重心到边界的最短距离，r_2为重心到边界的最大距离。圆形性（circularity，C）C也是反映目标区域形状的参数。是一个用目标区域中所有边界点定义的特征量：

$$C = \frac{\mu}{\sigma}$$

$$\mu = \frac{1}{k}\sum_{k=0}^{k\ 1} \| (x_k, y_x) - (x, y) \|$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{k}\sum_{k=0}^{k\ 1} \left[\| (x_k, y_k) - (x, y) \| - \mu \right]^2$$

其中，μ为区域重心到边界点的平均距离，σ^2为区域重心到边界点的距离的标准方差。偏心率（eccentricity，E）E有时也称为伸长度（elongation），它也在一定程度上描述了区域的紧凑性，定义为昆虫图像纵轴与横轴的比值。似圆度（roundness，R）R的定义为：

$$R = \frac{4A}{\pi L^2}$$

其中R为似圆度，A为目标区域面积，L为最大

长度（这里为昆虫图像的横轴长度）。亮斑数（hole number，H）是指目标区域内部具有的与目标区域不连通的小区域的数量。

以重复图像各项提取值的均值作为这种昆虫的特征值（赵汗青等，2002）。

1.2.3　数学形态特征分析：将提取出的结果进行统计，分析其在目分类阶元上总体均值的差异显著性，从而得出这些特征在不同分类阶元上作为分类特征的可靠性（王鉴明，1988；贾乃光，1993）。根据数学形态特征对不同目的昆虫总体均值的差异显著性检验用小样本检验，步骤为：先对各项特征的分布型作假设检验，看其是否符合正态分布；然后对方差进行齐性检验；最后进行总体均值差异显著性检验。另外根据分析的结果探讨基于数学形态特征角度上同一阶元下各昆虫类群的亲缘远近关系。

特征均值的分布型检验方法为：

H_0：总体遵从正态分布 $\longleftrightarrow$ H_i：总体不遵从正态分布

$$D = \sqrt{n}\left[\max_{x_1,\cdots x_n} | F_n(x) - F(x) |\right]$$

当 $D > D_{0.05}$ 时，拒绝 H_0。其中，n 为待检验特征的样本数量；$F_n(x)$为经验累积频率分布函数，$F(x)$为理论分布函数。

方差齐性检验方法为：设 m 为待检验的正态总体个数，其方差分别为 δ_1^2，δ_2^2，δ_3^2，…，δ_m^2，对 δ_1^2，δ_2^2，δ_3^2，…，δ_m^2 进行检验。

检验类型：H_0：$\delta_1^2 = \delta_2^2 = \delta_3^2 \longleftrightarrow H_1$：$\delta_1^2$，$\delta_2^2$，$\delta_3^2$ 至少两个不等

$$\chi^2 = 2.3026 * \left[\lg S^2 \sum_{i=1}^{m}(n_i - 1) - \sum_{i=1}^{m}(n_i - 1)\lg S_i'^2\right] / C \backsim \chi^2(m-1)$$

其中，

$$C = 1 + \frac{1}{3(m-1)}\left[\sum_{i=1}^{m}\frac{1}{n_i - 1} - \frac{1}{\sum_{i=1}^{m}(n_i - 1)}\right]$$

$$S^2 = \sum_{i=1}^{m} S_i'^2(n_i - 1) / \sum_{i=1}^{m}(n_i - 1)$$

设显著水平为 α，查自由度为 $m-1$ 的 χ^2 分布临界值 χ_α^2（$m-1$），则 $\chi^2 > \chi_\alpha^2$（$m-1$）为 H_0 的拒绝区域。

总体均值差异显著性检验：①如果方差齐性，用方差齐性的正态总体均值差异显著性检验的小样本法：

设 μ_1，μ_2 为两总体均值真值，对 μ_1，μ_2 的差异显著性进行 T 检验。

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 \longleftrightarrow H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$T = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \backsim t(n_1 + n_2 - 2)$$

其中，n_1，n_2，s_1^2，s_2^2，x_1，x_2 分别为来自总体 1 和总体 2 的样本单元数、样本方差和样本均值。于是，若显著水平为 α，则 H_0 的拒绝区域为 $|T| > t_\alpha$（$n_1 + n_2 - 2$）。

②如果方差非齐性，用方差非齐性正态总体均值差异显著性检验法：

设 μ_1，μ_2 为两总体均值真值，对 μ_1，μ_2 的差异显著性进行检验。

检验类型：H_0：$\mu_1 = \mu_2 \longleftrightarrow H_1$：$\mu_1 \neq \mu_2$

$$T = \frac{| x_1 - x_2 |}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \backsim t(\nu)$$

其中，n_1，n_2，s_1^2，s_2^2，分别为来自总体 1 和总体 2 的样本单元数、样本方差和样本均值；υ 为与

$$\frac{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{(s_1^2/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(s_2^2/n_2)^2}{n_2 - 1}}$$

最接近之正整数。于是，若显著水平为 α，则 H_0 的拒绝区域为 $|T| > t_\alpha(\upsilon)$。

2　结果与分析

2.1　34 种昆虫的 11 项数学特征值

提取的特征均值见表 1。

2.2　目级阶元各项特征的比较分析

由于同一个目内的昆虫体型变化也很剧烈，因此面积、周长、横轴长、纵轴长不宜作为目级阶元上的分类特征，故不进行统计分析。

2.2.1　总体分布假设检验：对 3 个目的总体分布假设检验分析 D 值见表 2。结果表明，3 个目的各项特征符合正态分布的假设成立。

表1 34种昆虫的11项数学形态特征提取值

Table 1 Eleven math-morphological features (MMF) extracted from thirty-four insect species

昆虫名称 Insect name	面积 *A*	周长 *P*	横轴长 *XL*	纵轴长 *YL*	形状参数 *F*	叶状性 *B*	球状性 *S*	圆形性 *C*	似圆度 *R*	偏心率 *E*	亮斑数 *H*
碧蝽 *Palomena angulosa* Motschulsky	2 718	215.9	48.3	74.6	1.3685	0.4080	0.4813	4.4155	1.4840	1.5470	1.00
麻皮蝽 *Erthesina fullo* (Thunberg)	4 725.7	302.7	60.4	104.5	1.4587	0.3560	0.3292	5.3520	1.6450	1.7310	1.00
褐奇缘蝽 *Derepteryx fuliginosa* (Uhler)	5 216.5	378.3	62.2	117.6	2.2014	0.2760	0.2210	4.0697	1.7350	1.9050	1.17
波原缘蝽 *Coreus potanini* (Jakovlev)	2 085.4	231.0	41.3	75.1	2.2619	0.3370	0.2964	4.0173	1.5620	1.8230	1.07
黑哎猎蝽 *Ectomocoris atrox* (Stål)	2 846.3	515.6	72.3	91.1	7.6470	0.1460	0.1320	2.4820	1.0360	1.6400	2.04
槐尺蛾 *Semiothisa cinerearia* Bremer *et* Grey	17 506.0	1 038.0	223.0	72.9	4.4105	0.1030	0.1745	5.8129	0.4540	0.3510	22.81
小地老虎 *Agrotis ypsilon* (Rottemberg)	20 365.0	932.9	273.5	117.8	3.3151	0.0890	0.1564	5.9004	0.3350	0.4310	10.12
棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner)	10 394.0	768.8	188.2	86.0	4.6860	0.0850	0.1510	4.9090	0.3720	0.4410	26.17
白点雍夜蛾 *Oederemia esox* Draudt	13 841.0	717.8	228.4	96.0	2.9797	0.0760	0.1389	5.8736	0.3380	0.4090	1.84
玉米螟 *Ostrinia furnacalis* Guenée	5 196.7	521.3	147.1	38.0	4.3450	0.0630	0.1110	4.0720	0.3480	0.3110	13.08
雀纹天蛾 *Theretra japonica* (Drary)	43 916.0	1 448.0	489.1	228.9	3.9122	0.0570	0.1082	7.3547	0.2330	0.4640	16.20
大蚕蛾 *Rhodinii jinkowskii hattoriae* Inoue	72 155.0	1 685.0	485.1	124.7	3.1418	0.0480	0.0839	7.7502	0.4420	0.2540	5.20
丁目大蚕蛾 *Aglia tiu* Linnaeus.	82 879.0	1 821.0	503.4	147.8	3.2009	0.0690	0.0865	9.3657	0.4260	0.2790	3.40
黄目大蚕蛾 *Caligula anna* Moore	103 368.0	2 143.0	561.0	156.4	3.5447	0.0410	0.0721	9.2434	0.420	0.2700	53.17
猫目大蚕蛾 *Salassa thespis* Leech	149 687.0	2 486.0	640.9	178.4	3.2970	0.0500	0.0861	9.7578	0.4640	0.2610	10.63
菜粉蝶 *Pieris rapae* Linnaeus	37 948.0	1 206.0	298.0	92.7	2.9014	0.0860	0.1443	6.9228	0.5510	0.3160	7.73
黄粉蝶 *Colias hyale* Linnaeus	38 479.0	1 105.0	305.9	105.1	2.5379	0.1100	0.1887	6.8861	0.5260	0.3440	1.22
山楂粉蝶 *Aporia crataegi dilata* Verity	54 812.0	1 494.0	375.5	117.5	3.2776	0.0640	0.1090	8.2751	0.4950	0.2640	1.39
尖钩粉蝶 *Conepteryx mahaguru aspasia* Ménétriês	60 053.0	1 344.0	377.2	125.4	2.4041	0.1140	0.1981	8.5203	0.5420	0.3210	1.76
黄环蛱蝶 *Neptis themis* Leech	42 783.0	1 317.0	404.3	102.2	3.3481	0.0700	0.1325	6.8177	0.3340	0.2280	43.55
独角仙 *Allomyrina dichotoma* (Linnaeus)	31 773.0	1 231.0	169.4	250.4	3.9299	0.3140	0.3243	5.7098	1.4320	1.4930	5.35
棕色鳃金龟 *Holotrichia titanis* Reitter	5 331.4	303.0	60.7	113.6	1.3733	0.4200	0.4238	5.5543	1.8440	1.8750	1.63
华北大黑鳃金龟 *Holotrichia oblita* (Faldermann)	5 252.0	299.6	60.7	113.0	1.3624	0.4220	0.4210	5.5642	1.82800	1.8700	1.57
中华弧绿丽金龟 *Popillia quadriguttata* Fabr.	4 350.3	266.8	59.3	98.0	1.3064	0.4360	0.4919	5.1625	1.5710	1.6520	6.74
铜绿丽金龟 *Anomala corpulenta* motschulsky	4 606.4	275.8	61.3	101.0	1.3186	0.4450	0.5138	5.3419	1.5580	1.6480	2.77
白星花金龟 *Potosia brevitarsis* Lewis	6 091.6	320.1	69.3	114.5	1.3410	0.4530	0.5159	5.5165	1.6140	1.6530	12.04
黄斑星天牛 *Anoplophora nobilis* (Ganglbauer)	8 011.5	488.4	60.8	167.3	2.3890	0.3490	0.2220	5.0108	2.7430	2.7500	16.20
松幽天牛 *Asemutm amurense* Eschscholtz	2 402.9	234.4	32.0	91.2	1.8593	0.3630	0.2253	4.1392	2.9910	2.8530	1.37
榆绿天牛 *Chelidonium provosti* (Fairmaire)	1 871.9	220.0	27.3	88.7	2.0668	0.4090	0.2228	3.6818	3.2140	3.2650	1.00
绿翅契天牛 *Saperda viridipennis* Gressitt	2 700.8	262.0	32.9	98.9	2.0320	0.4110	0.2490	3.9185	3.1760	3.0130	1.35
漆伪叶甲 *Podontia lutea* (Olivier)	2 190.3	206.2	36.6	79.7	1.5490	0.3690	0.3070	4.0979	2.1200	2.1850	1.00
多型虎甲红翅亚种 *Cicindela hytrida nitida* Lichtenstein	2 526.3	258.5	37.9	92.5	2.1092	0.2990	0.2107	3.4647	2.2630	2.4480	3.60
红胸萤 *Luciola lateralis* Motsch	3 664.2	287.3	52.5	79.8	1.8126	0.4030	0.4010	3.9394	1.6870	1.5300	1.71
血红沟胸叩甲 *Agrypnus davidi* (Fairmaire)	2 179.0	216.0	31.8	86.6	1.6985	0.3860	0.2606	4.0843	2.7710	2.7270	1.65

A: area; *P*: perimeter; *XL*: x-length; *YL*: y-length; *F*: shape-parameter; *B*: lobation; *S*: sphericity; *C*: circularity; *R*: roundness; *E*: eccentricity; *H*: hole number. The same for Table 2

表2 3个目各项特征的 *D* 值*

Table 2 D values of Hemiptera, Lepidoptera and Coleoptera*

	形状参数 *F*	叶状性 *B*	球形性 *S*	圆形性 *C*	似圆度 *R*	偏心率 *E*	亮斑数 *H*
半翅目 Hemiptera	0.4935	0.8305	0.1438	0.3392	0.2594	0.2057	0.4673
鳞翅目 Lepidoptera	0.1623	0.1871	0.4729	0.4009	0.3304	0.0988	0.3594
鞘翅目 Coleoptera	0.4460	0.5931	0.4031	0.8321	0.4103	0.5216	0.4464

* $D_{0.05} = 0.866$，各项特征的 D 值均小于 $D_{0.05}$（All D values are less than $D_{0.05} = 0.866$）

2.2.2　方差齐性检验：对3个目的各项特征值进行方差齐性检验。分别计算得形状参数、叶状性、球状性、圆形性、似圆度、偏心率、亮斑数的 χ^2，结果依次为：17.7888、69.4889、13.6209、6.2689、35.4842、42.4762 和 137.0714。取 $\alpha = 0.05$，$\chi_{0.05}^2(m-1) = \chi_{0.05}^2(2) = 5.991$。各特征的 χ^2 值都大于 $\chi_{0.05}^2(2)$，所以拒绝 H_0，即3个目的各项特征值总体方差非齐性。

2.2.3　差异显著性检验：（1）半翅目与鳞翅目：在经过总体分布检验和方差齐性检验后，对两目的各特征进行总体均值的差异显著性检验。计算半翅目和鳞翅目不同特征的 T 值，各 T 值依次是：0.4052、5.6552、3.0675、5.2622、9.673、23.3292 和 3.3628；各项 υ 值分别为 4、4、4、12、4、5 和 14；相应的 $t_{0.05}(\upsilon)$ 依次为 2.776、2.776、2.776、2.179、2.716、2.571 和 2.145。由结果可以看出，形状参数的 $T < t_{0.05}(\upsilon)$，不能拒绝 H_0，即半翅目和鳞翅目的形状参数总体均值差异不显著。其余各项特征的 T 值均大于相应的 $t_{0.05}(\upsilon)$，因此拒绝 H_0，即半翅目和鳞翅目的叶状性、球状性、圆形性、似圆度、偏心率、亮斑数总体均值差异显著。

（2）半翅目与鞘翅目：计算半翅目和鞘翅目不同特征的 T 值，各 T 值依次是：0.4052、2.0838、0.834、1.2629、3.5482、2.8616 和 2.3945；各 υ 值分别为 4、5、7、6、17、16 和 14；相应 $t_{0.05}(\upsilon)$ 值为 2.776、2.571、2.365、2.447、2.11、2.12 和 2.145。由结果可知，形状参数、叶状性、球状性、圆形性的 $T < t_{0.05}(\upsilon)$，不能拒绝 H_0，即半翅目和鞘翅目的形状参数、叶状性、球状性、圆形性总体均值差异不显著。其余各项特征的 T 值均大于相应的 $t_{0.05}(\upsilon)$，因此拒绝 H_0，即半翅目和鞘翅目的似圆度、偏心率、亮斑数总体均值差异显著。

（3）鳞翅目与鞘翅目：计算鳞翅目和鞘翅目不同特征的各 T 值依次为：4.28、3.3172、3.0638、5.3584、10.54、11.7843 和 2.5223；υ 值分别为：27、22、18、21、13、13 和 17；相应的 $t_{0.05}(\upsilon)$ 值为：2.052、2.571、2.093、2.08、2.16、2.16 和 2.11。由结果可知，各项特征的 T 值均大于相应的 $t_{0.05}(\upsilon)$，因此拒绝 H_0，即鳞翅目和鞘翅目的总体均值差异显著。

3　讨论

根据上面的结果可知，3个目的似圆度、偏心率、亮斑数总体均值差异显著，这3个特征在这3个目的分类鉴别中可以作为鉴别特征。半翅目与鳞翅目、鳞翅目与鞘翅目的叶状性、球状性、圆形性总体均值差异显著，但半翅目与鞘翅目的这3个特征总体均值差异不显著；半翅目与鳞翅目、半翅目与鞘翅目的形状参数总体均值差异均不显著。由此可以得出以下结论：在作为目级阶元分类特征时，各项特征的可靠性依次为：（似圆度、偏心率、亮斑数）>（叶状性、球状性、圆形性）>形状参数。另外，由这些特征的差异显著性可知，从数学形态特征角度讲，3个目的近缘关系远近大小依次为：半翅目与鞘翅目>半翅目与鳞翅目>鳞翅目与鞘翅目。

当一个特征能够作为昆虫分类的特征时，主要是该特征具有两个特性：第一是该特征有助于将不同的昆虫类群区分开；第二是同一昆虫类群中该特征稳定。在本文涉及到的34种昆虫中，我们利用面积、周长等11项数学形态特征可以把这些昆虫完全区分开，使计算机可以根据这些特征将不同的昆虫识别出来，即不需要人为辅助的自动识别，并且这11项特征在种的分类阶元上表现稳定（赵汗青等，2002）。这说明11项数学形态特征适合于作为种阶元上的分类特征特性。本研究分析所得出的结果也表明，似圆度、偏心率、亮斑数等7个特征在目分类阶元的昆虫类群总体均值差异显著性比较中都有过差异显著现象，具备作为昆虫分类特征的第一个特性。至于稳定性，在对每种昆虫重复图像的特征提取后分析，同种昆虫的各特征差异全都不显著，亦即同种昆虫的这些数学形态特征是稳定的。在不同的分类阶元上，存在着两种情况：某些数学形态特征在同一昆虫类群中表现稳定，而某些特征变化较大，不稳定。对于具体的一个数学形态特征来说，可能在某一分类阶元的同一昆虫类群中表现稳定，在另一阶元的同一类群中差异显著。以上结果说明，昆虫的数学形态特征在昆虫分类中可以作为分类特征，但其分类作用不是绝对的，要局限在一定的分类阶元范围内。这些内容将在后面两篇论文（Ⅱ、Ⅲ）中进一步论证。

由数学形态学角度得出的各目亲缘远近关系与传统分类学中得出的有不一致的地方。传统分类学认为鳞翅目与鞘翅目>鞘翅目与半翅目>半翅目与鳞翅目。这两个结论产生差别的原因还有待于进一步探讨。

由于我们研究的昆虫种类有限，并且只研究了

3个目，因此很难较全面的揭示昆虫数学形态特征在目级阶元分类学上的作用。希望更多的昆虫分类学工作者参与此项研究，我们欢迎合作并提供技术支持。相信随着技术手段的提高和越来越多昆虫学家研究的深入，目前还无法说明的一些问题，如更多适合与昆虫分类的数学形态特征的获取、每种数学形态特征适合的分类范围等都将会得到解决。

参 考 文 献 (References)

Baxes G A, 1994. Digital Image Processing Principle and Applications. New York: John Wiley & Sons Inc.

Cui Q, 1996. Mathematical Image Process Technology and Implication. Beijing: Electronic Industry Press. [崔屹, 1996. 数字图像处理技术与应用. 北京: 电子工业出版社]

Giribet G, Edgecombe G D, Wheeler W C, 2001. Arthropod phylogeny based on eight molecular loci and morphology, *Nature*, 413 (13): 157-161.

Smith J B, 2000. Computer vision. *Computer Vision Image Understand*, 79: 347-392.

Jia N G, 1993. Statistics. 2nd edition. Beijing: China Forestry Press. [贾乃光, 1993. 数理统计 (第2版). 北京: 中国林业出版社]

Li Y J, 1985. Image Recognition Technology and Its Implication. Beijing: Mechanical Industry Press. [李月景, 1985. 图像识别技术及其应用. 北京: 机械工业出版社]

Liu J D, 1996a. The expert system for identification of Tortricinae (Lepidoptera) using image analysis of venation. *Entomologia Sinica*, 3 (1): 1-8.

Liu J D, 1996b. How to construct the expert system for species identification using venation of Tortricinae (Lepidoptera). *Entomologia Sinica*, 3 (2): 133-137.

Ma S D, Zhang Z Y, 1998. Computer Vision Technology. Beijing: Science Press. [马颂德, 张正友, 1998. 计算机视觉技术. 北京: 科学出版社]

Parker J R, 1996. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. New York: John Wiley & Sons.

Boyle R D, Thomas R C, 1988. Computer Vision: A First Course. Oxford: Blackwell Scientific.

Serra J, 1982. Image Analysis and Mathematical Morphology. London: Academic Press.

Shen Z R, Yu X W, 1998. Perspective and research of mathematical insect morphology and its application. *Acta Entomol. Sin.*, 41 (Suppl.): 140-148. [沈佐锐, 于新文, 1998. 昆虫数学形态学研究及其应用展望. 昆虫学报, 41 (增刊): 140-148]

Tanimoto S L, 1995. Exploring mathematics with image processing. Proceedings of the 1995 IFIP World Conference on Computers in Education, Birmingham, UK, July 23-28. London: Chapman & Hall. 805-814.

Wang J M, 1988. Biological Statistics. Beijing: Agricultural Press. [王鉴明, 1988. 生物统计学. 北京: 农业出版社]

Yuan F, 1996. Insect Taxonomy. Beijing: China Agricultural Press. 12-17. [袁锋, 1996. 昆虫分类学. 北京: 中国农业出版社. 12-17]

Zhang Y J, 1997. Image Process and Analysis. Beijng: Tsinghua University Press. [章毓晋, 1997. 图像处理和分析. 北京: 清华大学出版社]

Zhao H Q, Shen Z R, Yu X W, 2002. On computer-aided insect identification through math-morphology features. *Journal of China Agricultural University*, 7 (3): 38-42. [赵汗青, 沈佐锐, 于新文, 2002. 数学形态学应用于昆虫自动鉴别的研究. 中国农业大学学报, 7 (3): 38-42]